

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21457

镁改性生物炭配施磷肥对红壤磷有效性及小麦产量的影响

吴行¹, 郑琴², 张帅¹, 成宇阳¹, 王秀斌^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2. 北京市地质工程设计研究院, 北京 101500)

摘要: 利用盆栽试验探究镁改性生物炭和磷肥配施对红壤磷素有效性及小麦产量的影响, 试验设置对照 (CK)、单施磷肥 (P)、单施镁改性生物炭 (MgBC) 和磷肥配施镁改性生物炭 (P+MgBC) 4 个处理。结果表明, 单施镁改性生物炭或单施磷肥均可增加土壤有效磷 (AP) 含量, 且两者配施其含量显著高于单施。P+MgBC 处理土壤 AP 含量较 CK、P 和 MgBC 处理分别显著增加 90.4%、34.2% 和 59.5%, 且土壤 AP 含量与磷酸酶 (Pho) 活性、微生物量磷 (MBP) 及土壤有机碳 (SOC) 呈显著正相关。与 CK 处理相比, MgBC 和 P+MgBC 处理小麦产量均显著增加, 其中 P+MgBC 处理产量增幅最大, 平均增加 27.1%, 但 P 处理其产量较 CK 处理差异不显著。P+MgBC 处理的小麦植株和籽粒磷含量较 CK 和 P 处理均显著增加, 但与 MgBC 处理无显著差异。P+MgBC 处理的小麦植株和籽粒磷吸收量较其他处理均显著增加, 增幅范围分别为 40.6% ~ 114.3% 和 18.7% ~ 58.6%。综上, 与单施磷肥或单施镁改性生物炭相比, 镁改性生物炭配施磷肥, 不仅提高了红壤磷素有效性, 还提高了小麦产量和吸磷量, 为酸性土壤作物系统磷肥高效利用提供了一定的理论依据。

关键词: 改性生物炭; 磷肥; 酸性红壤; 磷有效性; 小麦产量

为满足人口增长对粮食的需求, 大量磷肥被投入到农业生产中, 而施入土壤的磷素通过吸附、沉淀和同晶置换等作用被迅速固定, 导致磷肥当季利用率一般不足 20%^[1]。特别是在我国南方地区土壤 Fe、Al、Mn 含量高, 极易固定土壤中的磷素^[2]。同时, 磷素的大量投入还会造成一系列环境问题, 如磷素流失引发的水体富营养化、磷矿资源开采产生的污染等问题^[3]。因此, 亟须寻求能提高土壤磷素有效性和减少磷肥施用以降低环境污染的方法。

生物炭是生物质在限氧条件下高温热解得到的产物, 具有碳含量高、孔隙结构发达、高比表面积等特点, 近年来被广泛用作土壤改良剂^[4-5]。研究发现, 生物炭施入土壤后, 自身丰富的矿质养分能够提高土壤有效磷等养分含量^[5-6]。同时, 生物炭较大的比表面积和丰富的孔隙结构还能为微生物提供生存空间, 利于磷素转化相关微生物的活动, 促进微生物对磷素的固持和有机磷的矿化, 提高土壤

磷素有效性^[7]。然而, 传统热解制得的生物炭同样存在缺点, 其表面基团种类有限且含有大量负电荷^[8], 对磷酸盐等阴离子吸附能力有限。而近年来, 通过负载金属氧化物制得的改性生物炭, 在土壤中表现出优异的阻控磷素淋失的性能^[9-11]。但迄今为止, 金属改性生物炭的施用对土壤磷素有效性和作物生长的影响却鲜见报道。

酸性红壤中大量游离的 Fe、Al 是导致磷素固定的主要因素^[2], Al 对部分作物还会产生毒害作用^[12], 而 Mg 可以避免上述问题, 同时也是植物叶绿素合成所必需的。因此, 本文拟选用酸性红壤、以镁改性生物炭 (MgBC) 为供试材料, 通过盆栽试验探究镁改性生物炭与磷肥配施对土壤磷有效性、小麦产量和吸磷量的影响, 旨在阐明镁改性生物炭在酸性红壤上的应用效果, 为改善土壤质量、提高磷素有效性和小麦产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自湖北省赤壁市赵李桥镇小麦产区 (29°34' N, 113°55' E), 土壤类型为酸性红壤, 质地为壤土, 取样深度为 20 cm。样品取回后在室

收稿日期: 2021-08-26; 录用日期: 2021-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200502)。

作者简介: 吴行 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为养分循环。

E-mail: ndwuhang@163.com。

通讯作者: 王秀斌, E-mail: wangxiubin@caas.cn。

温下自然风干, 过 2 mm 筛, 以便充分混匀和去除非土壤样品 (根系和石块)。土壤基础理化性质 pH 4.97, 电导率 (EC) 590 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 土壤有机碳 (SOC) 含量为 9.82 g/kg, 全磷 (TP) 和全氮 (TN) 含量分别为 0.78 和 0.76 g/kg, 有效磷 (AP) 含量为 34.71 mg/kg, 速效钾 (AK) 含量为 116.99 mg/kg。

试验所用镁改性生物炭 (MgBC) 制备方法如下: 称取一定量小麦秸秆放入微波马弗炉 (SX2, 上海), 在 N_2 (250 L/h) 氛围下, 将马弗炉从室温

加热到 600 $^{\circ}\text{C}$ (10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。在最高温度下将秸秆热解 2 h, 自然冷却后即得到原始的未改性生物炭 (BC)。将制备好的生物炭研磨混匀, 过 2 mm 筛后备用。使用 0.5 mol/L MgCl_2 溶液浸渍 BC (固液比 = 1 : 20), 并用 0.1 mol/L HCl 或 0.1 mol/L NaOH 溶液调节混合液 pH 为 8。将混合液于 85 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h 后过滤, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干, 即得到 MgBC。将 MgBC 研磨混匀过 2 mm 筛, 于干燥器中存放备用, MgBC 的基本性质见表 1。

表 1 镁改性生物炭的基本理化性质

生物炭	C (%)	N (%)	P (%)	K (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	S_{BET} (m^2/g)
MgBC	54.55	0.55	1.29	8.17	7.59	801.75	292.21

注: S_{BET} 表示炭材料比表面积。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2018 年 10 月 11 日至 2019 年 6 月 8 日在中国农业科学院网室内进行。试验设置 4 个处理, 对照 (CK, 不施磷肥和生物炭) 处理、单施磷肥 (P) 处理、单施 1% 镁改性生物炭 (MgBC) 处理和磷肥配施 1% MgBC (P+MgBC) 处理, 每个处理 4 次重复, 随机排列。试验开始前将 5 kg 风干土与 MgBC 混匀后装入无底漏塑料盆中 (上口直径 21.5 cm, 底直径 17 cm, 高 21 cm)。各处理氮肥和钾肥均等量施入, 氮磷钾肥用量 (kg/hm^2) 为 $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}=210-180-90$, 其中磷肥、钾肥以及 50% 的氮肥作为基肥施用, 剩余 50% 氮肥在返青期做追肥施用。氮磷钾肥分别为尿素、磷酸二氢钠和氯化钾。小麦每盆播种 30 粒, 出苗后定植 20 株。供试小麦品种为郑麦 7698。小麦整个生育期定量浇水, 维持土壤水分在最大田间持水量的 60% 左右。2019 年 6 月 8 日小麦收获后, 将盆中土壤全部倒出, 进行破坏性取样。土壤样品过 2 mm 筛, 充分混匀并去除根系。每个样本分为 2 份, 一部分在室温下自然风干后分别过 1 和 0.15 mm 筛, 用于测定土壤理化指标; 一部分鲜样保存于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中, 用于测定土壤微生物量及酶活性。地上部秸秆和籽粒全部收获后于 105 $^{\circ}\text{C}$ 下杀青, 65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 进行产量和养分的测定。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH 按水土比 2.5 : 1 混合后用 pH 计测定; EC 按水土比 5 : 1 混合后用电导率仪测定; SOC 采用重铬酸钾氧化 - 外加热法测定; TP 采用高氯酸

消解 - 钼锑抗显色法测定; AP 采用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗显色法测定; 微生物量磷 (MBP) 采用氯仿熏蒸 - 碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗显色法测定, 具体方法参照《土壤农化分析》^[13]。

土壤磷素活化系数 (PAC, %) = 土壤有效磷含量 / 土壤全磷含量 $\times 100$

土壤磷酸酶 (Pho) 活性采用荧光微孔板酶检测法测定。该方法的原理是酶的标准底物被水解后, 产生 4- 甲基伞形酮 (4-methylumbelliferyl) 或 7- 氨基-4- 甲基香豆素 (7-amino-4-methylcoumarin), 并用其荧光值的强度来表征土壤胞外酶活性。具体步骤参考 Ai 等^[14]的方法, 酶活性计算如下:

淬灭系数 (flour./nmol) = (标准对照 - 样品对照) / 标准荧光

激发系数 (flour./nmol) = 标准荧光 / 0.5 (nmol)

净荧光值 (flour.) = (样品荧光 - 样品对照) / 淬灭系数 - 底物对照

胞外酶活性 = 净荧光值 $\times 100$ (mL) $\times 100$ / [激发系数 $\times 0.2$ (mL) \times 时间 (h) \times 土壤干重 (g)]

1.4 数据统计

试验数据采用 SPSS 23.0 进行方差、相关性分析。利用 Excel 2019 进行图表绘制。多重比较利用 LSD 法; 相关性分析运用 Pearson 双侧检验。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷、有效磷含量及磷素活化系数

由图 1a、b 可知, 随磷肥和镁改性生物炭的

投入, AP 和 TP 含量较 CK 处理均增加。P+MgBC 处理 TP 含量较 CK 和 P 处理分别显著增加 18.9% 和 15.8% ($P<0.05$), 而与 MgBC 处理差异不显著 ($P>0.05$)。与 CK 处理相比, P、MgBC 及 P+MgBC 处理 AP 含量均显著增加, 分别增加 41.7%、19.3%

和 90.6%。P 和 P+MgBC 处理的 PAC 较 CK 处理均显著增加 (图 1c), 而 CK 处理与 MgBC 处理的 PAC 无显著变化 ($P>0.05$)。土壤 AP、TP 含量和 PAC 均以 P+MgBC 处理最高。

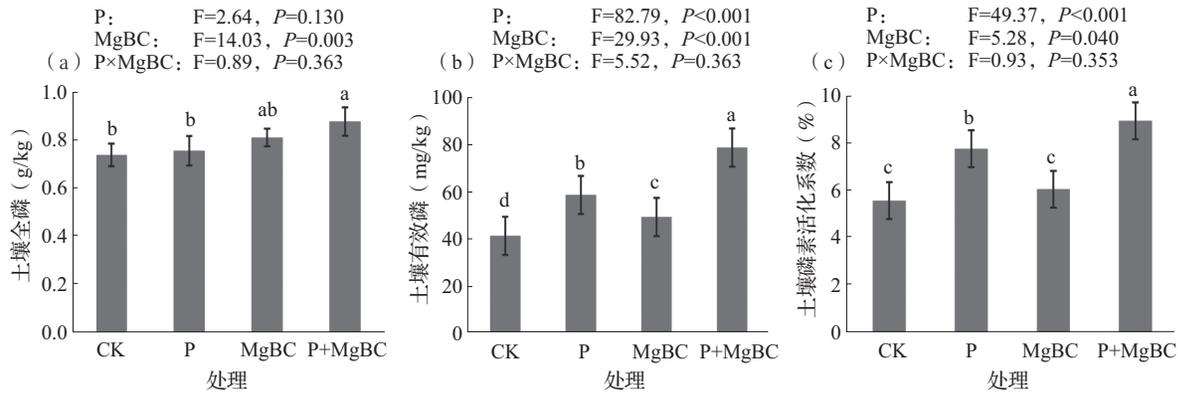


图 1 不同处理土壤全磷、有效磷含量及磷素活化系数

注: 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

双因素方差分析表明, 施用磷肥显著影响了土壤 AP 含量和 PAC, 添加 MgBC 显著影响了土壤 AP 含量, 而土壤 AP、TP 含量和 PAC 不受二者交互作用的影响。

2.2 土壤磷有效性的影响因素及相关性分析

由表 2 可知, 与 CK 处理相比, P 处理土壤 pH、EC 和 SOC 含量无显著变化, 而 MgBC 和 P+MgBC 处

理均显著增加, 分别增加 1.88 和 1.95 个单位 (pH)、7.2% 和 11.1% (EC)、104.2% 和 112.1% (SOC)。P、MgBC 和 P+MgBC 处理的土壤 MBP 含量较 CK 处理均显著增加 ($P<0.05$), 但 3 个处理间差异不显著。所有施肥处理 Pho 活性均显著高于 CK 处理, 其中 P、MgBC 和 P+MgBC 处理其活性较 CK 处理分别增加了 33.9%、18.9% 和 53.4%。

表 2 各处理土壤 pH、EC、SOC、Pho 及 MPB 含量

处理	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{m}$)	SOC (g/kg)	MBP (mg/kg)	Pho [nmol/(h·g)]
CK	5.08 ± 0.12b	649.57 ± 15.12b	15.64 ± 2.29b	11.08 ± 0.83b	488.09 ± 31.23d
P	5.11 ± 0.17b	634.82 ± 20.02b	14.25 ± 0.89b	14.01 ± 0.73a	650.61 ± 74.84b
MgBC	6.96 ± 0.28a	696.21 ± 35.18a	31.94 ± 0.71a	14.00 ± 0.47a	580.55 ± 30.44c
P+MgBC	7.03 ± 0.42a	721.51 ± 12.52a	33.18 ± 1.05a	14.25 ± 1.03a	748.54 ± 23.75a
P	ns	ns	ns	**	***
MgBC	***	***	***	**	**
P × MgBC	ns	ns	**	**	ns

注: 数据为均值 ± 标准偏差, 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$), ***, **, * 和 ns 分别表示 $P<0.001$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 和不显著。表 4 同。

双因素方差分析表明, 施用磷肥显著影响了土壤 Pho 的活性和 MBP 的含量, 添加 MgBC 显著影响了土壤 pH、EC、SOC、MBP 的含量和 Pho 的活性, 且两者交互作用显著影响了 SOC 和 MBP 含量。

相关性分析表明, 土壤 AP 与 Pho 和 MBP 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 SOC 呈显著正相关

($P<0.05$) (表 3)。各指标与土壤 AP 的相关系数分别为 Pho (0.837) > MBP (0.596) > SOC (0.501), 这在一定程度上表明, 土壤 Pho、MBP 和 SOC 的增加提高了土壤 AP 含量。但土壤 AP 与 SOC、Pho 和 MBP 3 个指标均呈显著正相关, 具体各指标对土壤 AP 含量的贡献仍需进一步深入分析。

表3 土壤有效磷与土壤理化性质、微生物指标的相关性分析

指标	AP	pH	EC	SOC	Pho	MBP
AP	1					
pH	0.490	1				
EC	0.446	0.819**	1			
SOC	0.501*	0.960**	0.839**	1		
Pho	0.837**	0.473	0.327	0.455	1	
MBP	0.596**	0.569*	0.388	0.489	1.000**	1

注: **表示在 0.01 水平上极显著相关, *表示在 0.05 水平显著相关。表 5 同。

通过逐步回归分析土壤 AP 与各指标间的关系。土壤 AP 与 SOC、Pho 和 MBP 进行逐步回归分析, 可得方程: $y = -16.455 + 0.119x$ ($R^2 = 0.701$), 其中 x 为 Pho, y 为土壤 AP, 表明土壤 Pho 活性的增加有利于土壤 AP 含量的提高。

2.3 小麦生物量和磷素吸收量

MgBC 和磷肥的投入增加了小麦生物量、磷含量和磷吸收量 (表 4)。与 CK 处理相比, MgBC 和 P+MgBC 处理的植株、籽粒干重均显著增加, 分别增加 39.5% 和 14.5% (MgBC)、75.1% 和 27.1% (P+MgBC)。各处理植株、籽粒磷含量变化规律一

致, 与 CK 处理相比, P+MgBC 处理植株、籽粒磷含量显著增加, 分别增加 23.1% 和 22.9%。与 P 处理相比, P+MgBC 处理植株、籽粒磷含量分别显著增加 18.5%、18.5%, 而 P+MgBC 与 MgBC 处理间无显著差异。小麦植株、籽粒磷吸收量变化规律相似, P 处理籽粒磷吸收量较 CK 处理无显著差异 ($P > 0.05$), P+MgBC 处理植株磷吸收量较 P、MgBC 处理分别显著增加 65.8%、40.6%, 籽粒磷吸收量分别显著增加 45.2%、18.7%。植株干重、籽粒干重、植株磷含量、籽粒磷含量、植株磷吸收量和籽粒磷吸收量均以 P+MgBC 处理最高。

表 4 不同处理对小麦生物量和吸磷量的影响

处理	植株干重 (g/盆)	籽粒干重 (g/盆)	磷含量		磷吸收量	
			植株 (g/kg)	籽粒 (g/kg)	植株 (mg/盆)	籽粒 (mg/盆)
CK	12.42 ± 1.84c	11.13 ± 0.70c	1.04 ± 0.07b	2.92 ± 0.20b	12.87 ± 1.85d	32.37 ± 1.68c
P	15.48 ± 1.97ab	12.01 ± 0.72bc	1.08 ± 0.08b	3.03 ± 0.23b	16.63 ± 1.41c	35.36 ± 0.61c
MgBC	17.33 ± 1.56b	13.30 ± 1.84ab	1.13 ± 0.02ab	3.24 ± 0.14ab	19.62 ± 1.72b	43.24 ± 7.33b
P+MgBC	21.74 ± 3.13a	14.14 ± 0.81a	1.28 ± 0.12a	3.59 ± 0.32a	27.58 ± 2.34a	51.33 ± 5.21a
P	**	ns	*	ns	***	*
MgBC	***	**	**	**	***	***
P × MgBC	ns	ns	ns	ns	*	ns

双因素方差分析表明, 施用磷肥显著影响了植株干重、植株磷含量、植株磷吸收量和籽粒磷吸收量, 添加 MgBC 显著影响了植株干重、籽粒干重、植株磷含量、籽粒磷含量、植株磷吸收量和

籽粒磷吸收量, 且两者交互作用显著影响了植株磷吸收量。相关性分析表明, 小麦产量和土壤 AP、pH、EC、SOC 及 MBP 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$, 表 5)。

表 5 小麦产量与土壤理化性质、微生物指标的相关性分析

指标	产量	AP	pH	EC	SOC	Pho	MBP
产量	1						
AP	0.549*	1					
pH	0.761**	0.490	1				
EC	0.696**	0.446	0.819**	1			
SOC	0.687**	0.501*	0.960**	0.839**	1		
Pho	0.457	0.837**	0.473	0.327	0.455	1	
MBP	0.505*	0.596**	0.569*	0.388	0.489	1.000**	1

3 讨论

3.1 土壤磷有效性对镁改性生物炭和磷肥施用的响应

已有研究证实, 镁改性生物炭施入土壤后能够改善土壤理化性质, 提高土壤养分含量^[5, 15]。本研究发现, 镁改性生物炭的投入能显著增加土壤有效磷含量, 提高土壤磷素活化系数, 较单施磷肥处理, 镁改性生物炭和磷肥配施对提高土壤有效磷含量及磷活化能力更具有优势。这与吕伟静等^[16]研究结果一致, 其发现改性生物炭的施用可以显著提高土壤有效磷含量, 可能是由于改性生物炭本身含有磷素, 并且原材料秸秆热解过程中有机磷的化学键断裂, 形成磷酸盐补充到土壤中^[17]; 同时, Wu等^[9]还发现, 镁改性生物炭对磷酸盐具有较强的吸附能力, 能够将磷素留存在土壤中, 从而提高土壤有效磷含量。

本研究还发现, 镁改性生物炭配施磷肥能显著提高土壤 pH 和土壤有机碳含量, 且土壤有效磷含量与土壤有机碳含量呈显著正相关。这可能是因为酸性土壤中偏低的 pH 限制了磷素有效性, 高 pH 的镁改性生物炭添入酸性土壤提高了土壤 pH, 利于土壤 Al-P 和 Fe-P 的溶解, 进而提高酸性土壤中磷素有效性^[2]。杨兰等^[18]利用不同的改性方法制得 pH 差异大的炭产品添加到土壤后发现, 土壤 pH 与改性生物炭的 pH 密切相关, 表明改性生物炭自身性质对土壤 pH 影响显著。此外, 土壤有机碳是评价土壤肥力状况的重要指标, 本试验添加镁改性生物炭后, 显著提高了土壤有机碳含量, 与 Kavitha 等^[19]和王波等^[20]研究结果吻合。这是由于改性生物炭本身碳含量丰富, 施入土壤后可以直接增加有机碳含量; 其次, 因其多孔结构, 改性生物炭施入土壤能改善土壤孔隙结构和保水性能, 增加土壤团聚体稳定性, 减少因团聚体破坏而导致的土壤有机碳分解。有研究表明, 土壤有机碳含量的增加有利于难溶性磷转化为有效磷, 因为土壤有机碳可以作为微生物的能源, 促进难溶性磷的转化^[21]; 同时, 土壤有机碳含有大量羧基、羟基等带负电的官能团, 能够减少土壤对磷酸根的固定, 磷素有效性提高。

磷酸酶来源于土壤微生物和植物根系, 用来水解不同的土壤磷组分, 直接影响土壤磷素有效性^[22]。本研究结果表明, 镁改性生物炭和磷肥投

入土壤后, 能显著提高土壤磷酸酶活性, 且土壤有效磷含量与磷酸酶活性呈极显著正相关。这与王波等^[20]研究结果相符, 发现镁改性生物炭施入土壤后, 土壤磷酸酶活性显著提高, 大豆根长、株高等指标也优于对照组, 表明镁改性生物炭可以提高土壤磷酸酶活性, 促进土壤磷素转化。可能是改性生物炭较大的比表面积能够吸附较多的酶底物, 利于酶作用进而提高酶活性^[23]; 并且丰富的孔隙结构和较大的比表面积, 能够吸附可供微生物利用的水溶性有机物, 还能为微生物提供生存空间, 利于微生物生长繁殖^[24-25], 从而提高土壤磷酸酶活性; 生物炭还能改善土壤板结情况和团聚体结构, 降低土壤容重和紧实度, 利于植物根系的生长, 从而促进根系分泌磷酸酶^[26]。试验添加的镁改性生物炭已被广泛证实具有丰富的孔隙结构和较大的比表面积, 吸附性能优异, 但具体如何影响土壤磷酸酶活性, 是否和未改性生物炭发挥的作用一致, 还需进一步研究。此外, 微生物量磷是土壤中重要的有效磷源, 微生物量磷含量越高, 土壤磷素肥力水平越高^[27]。研究结果显示, 单施磷肥及镁改性生物炭配施磷肥均显著提高土壤微生物量磷含量。王国兵等^[28]研究发现, 添加生物炭显著提高土壤微生物量磷含量, 可能是生物炭的添加改变了土壤微生态环境, 进而影响土壤微生物的生长^[29]。综上, 改性生物炭可以改变土壤 pH, 提高土壤有机碳含量、磷酸酶活性和土壤微生物量磷含量, 具有作为土壤改良剂的潜力, 但改性生物炭具体如何发挥作用, 其作用机理与未改性生物炭之间存在什么差异, 还需进一步探讨研究。

3.2 小麦生物量和磷吸收量对镁改性生物炭和磷肥施用的响应

改性生物炭具有丰富的孔隙结构和较强的吸附能力, 在土壤中能够减少养分淋失, 起到一定的保水保肥功效, 为作物生长提供养分, 并提高作物产量^[30]。Wu 等^[9]将镁改性生物炭施入盐碱土后发现, 植株磷含量和水稻产量显著增加; 余炜敏等^[31]将改性生物炭施入南方菜地土壤中, 不仅提高了小白菜的吸磷量和产量, 其品质也有所改善; 而郭大勇等^[32]发现在碱性土壤中加入改性生物炭后玉米植株磷含量反而降低。可见, 改性生物炭的应用不仅要注意炭本身的性质, 还要考虑作物种类、土壤类型等生产因素。本研究发现, 镁改性生物炭与磷肥配施后, 小麦植株、籽粒磷含量均较磷

肥单施有所提高,可能是镁改性生物炭对水、肥的蓄持,增加了根系范围内可用的水分和养分,利于作物吸收利用^[33],使小麦的吸磷量和产量增加。白玉超等^[34]发现,将改性稻壳生物炭与肥料配施,不仅提高了土壤有效磷含量,还促进了玉米的生长,提高了磷素吸收和磷肥利用率。因为改性生物炭独特的结构不仅可以吸附磷素,其表面存在的电荷还能吸附与 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等螯合的有机分子,缓解土壤中 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等螯合物对磷肥的固定^[35],从而提高作物对磷肥的吸收利用。镁改性生物炭的投入,短期内能提高土壤养分含量,改善土壤理化性质,但短期的盆栽试验与农田实际生产间存在差异,因此还需进行长期田间试验,更系统、深入地探究改性生物炭在农田土壤中是否可以持续有效地发挥作用。

4 结论

本文通过短期的盆栽试验发现,镁改性生物炭与磷肥配施可显著提高土壤磷素有效性,且土壤有效磷含量与土壤有机碳、微生物量磷和磷酸酶活性呈显著正相关。本研究还发现,镁改性生物炭与磷肥配施小麦植株、籽粒磷含量和磷吸收量较单施磷肥处理均显著增加,小麦产量较单施磷肥处理显著增加了17.7%,且小麦产量与土壤pH、电导率、有效磷、有机碳及微生物量磷含量呈显著正相关。然而,本研究结果可能与大田试验存在一定的差异性,故亟须开展长期田间试验进行深入系统的研究。

参考文献:

- [1] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [2] 李杰,石元亮,陈智文.我国南方红壤磷素研究概况[J].土壤通报,2011,42(3):763-768.
- [3] 席雪琴,孙本华,陈勇,等.瘠土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J].中国土壤与肥料,2015(6):34-40.
- [4] 杨彩迪,宗玉统,卢升高.不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J].环境科学,2020,41(4):1914-1920.
- [5] 宋大利,习向银,黄绍敏,等.秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):369-379.
- [6] Li N, Wen S Y, Wei S K, et al. Straw incorporation plus biochar addition improved the soil quality index focused on enhancing crop yield and alleviating global warming potential [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 21 (1-2): 101316.
- [7] 刘玉学,唐旭,杨生茂,等.生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1690-1695.
- [8] Tom S, Teresa F, Gökçen A, et al. Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water [J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 34-47.
- [9] Wu L P, Wei C B, Zhang S R, et al. MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 901-909.
- [10] 王静,付伟章,葛晓红,等.玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2810-2820.
- [11] Zheng Q, Yang L F, Song D L, et al. High adsorption capacity of Mg/Al-modified biochar for phosphate and its potential for phosphate interception in soil [J]. Chemosphere, 2020, 259: 127469.
- [12] 郭天荣,张国平.麦类作物铝毒害及耐铝机理研究进展[J].麦类作物学报,2006,26(1):135-137.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000
- [14] Ai C, Liang G Q, Sun J W, et al. The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51 (4): 465-477.
- [15] Chen X, Yang S H, Ding J, et al. Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation [J]. Water, 2021, 13 (2): 209-209.
- [16] 吕伟静,陈冉,马志婷,等.生物炭及改性生物炭对平邑甜茶幼苗生长及土壤的影响[J].植物生理学报,2021,57(3):597-604.
- [17] Gul S, Joann K, Whalen. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 1-15.
- [18] 杨兰,李冰,王昌全,等.改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J].环境科学,2016,37(9):3562-3574.
- [19] Kavitha B, Reddy P, Kim B, et al. Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 227: 146-154.
- [20] 王波,罗婷,勾曦,等.碱活化载镁橘皮生物炭除磷后对土壤的改良作用[J].农业环境科学学报,2021,40(1):155-162.
- [21] Yusran F H. The relationship between phosphate adsorption and soil organic carbon from organic matter addition [J]. Journal of Tropical Soils, 2010, 15 (1): 1-10.
- [22] Wang J P, Wu Y H, Zhou J, et al. Carbon demand drives microbial mineralization of organic phosphorus during the early stage of soil development [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52 (6): 825 - 839.

- [23] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [24] 崔虎, 王莉霞, 欧洋, 等. 生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (2): 412-421.
- [25] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandiodult [J]. Geoderma, 2010, 154 (3-4): 281-288.
- [26] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31 (10): 3424-3432.
- [27] Ma N, Qi M, Li T. Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities at different developmental stages of tomato [J]. Journal of Pure and Applied Microbiology, 2014, 8: 647-652.
- [28] 王国兵, 王瑞, 徐瑾, 等. 生物炭对杨树人工林土壤微生物生物量碳、氮、磷及其化学计量特征的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43 (2): 1-6.
- [29] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil [J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 47-82.
- [30] Shi W, Ju Y Y, Bian R J, et al. Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching [J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134424.
- [31] 余炜敏, 石永锋, 王荣萍, 等. 改性生物炭对小白菜生长和磷素吸收的影响 [J]. 生态环境学报, 2018, 27 (10): 1878-1882.
- [32] 郭大勇, 商东耀, 王旭刚, 等. 改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响 [J]. 河南农业科学, 2017, 46 (2): 22-27.
- [33] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素、钾素有效性的微生态机制 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [34] 白玉超, 邓宝元, 史海莉, 等. 改性稻壳炭和改性沸石对红壤磷有效性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (2): 31-39.
- [35] Bornemann L C, Kookana R S, Welp G. Differential sorption behaviour of aromatic hydrocarbons on charcoals prepared at different temperatures from grass and wood [J]. Chemosphere, 2007, 67 (5): 1033-1042.

Effect of combined application of magnesium modified biochar and phosphorus fertilizer on phosphorus availability and wheat yield in red soil

WU Hang¹, ZHENG Qin², ZHANG Shuai¹, CHENG Yu-yang¹, WANG Xiu-bin^{1*} (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Beijing Geological Engineering Design Institute, Beijing 101500)

Abstract: The effects of combined application of magnesium modified biochar and phosphorus fertilizer on phosphorus availability and wheat yield in red soil were studied. Four treatments were set up, including control (CK), single application of phosphorus fertilizer (P), single application of magnesium modified biochar (MgBC) and phosphorus fertilizer combined with magnesium modified biochar (P+MgBC). The results showed that the application of magnesium modified biochar or phosphorus fertilizer alone increased the content of soil available phosphorus (AP), and the content of soil AP in the combined application of magnesium modified biochar and phosphorus fertilizer was significantly higher than that in the treatment of magnesium modified biochar or phosphorus fertilizer alone. The content of soil AP in P+MgBC treatment was significantly higher than that in CK, P and MgBC treatments by 90.4%, 34.2% and 59.5%, respectively, and the content of soil AP was significantly positively correlated with phosphatase (Pho) activity, microbial biomass phosphorus (MBP) and soil organic carbon (SOC). Compared with CK treatment, the wheat yield of MgBC and P + MgBC treatments increased significantly, among which the yield of P+MgBC treatment increased the most, with an average increase of 27.1%, but the yield of P treatment was not significantly different from CK treatment. The phosphorus content of wheat plants and grains treated with P+MgBC was significantly higher than that of CK and P treatments, but there was no significant difference with MgBC treatment. The phosphorus uptake of wheat plants and grains treated with P+MgBC increased significantly compared with other treatments, with an increase range of 40.6% ~ 114.3% and 18.7% ~ 58.6%, respectively. In conclusion, compared with single application of phosphorus fertilizer or single application of magnesium modified biochar, magnesium modified biochar combined with phosphorus fertilizer can not only improve the phosphorus availability of red soil, but also improve the yield and phosphorus uptake of wheat, which provides a theoretical basis for the efficient utilization of phosphorus fertilizer in acid soil crop system.

Key words: modified biochar; phosphate fertilizer; acid red soil; phosphorus availability; wheat yield